

煤矿开采对窟野河地表径流影响的水文模拟

郭巧玲¹, 韩振英¹, 杨琳洁², 熊新芝¹

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南黄河水文勘测设计院, 河南 郑州 450003)

摘要:为了探明煤炭开采与窟野河河川径流减少甚至断流之间的关系,利用窟野河控制性水文站——温家川站 1953—2010 年逐日流量资料及相关水文气象资料,在对其径流变化特性进行分析的基础上,通过黄河月水量平衡模型模拟定量评价煤矿开采对地表径流的影响。结果表明:1953 年以来,窟野河流域实测径流量以 1979 年和 1999 年为转折点总体上呈现阶段性减少趋势;人类活动对径流减少影响的比例由 1979—1998 年的 39.44% 快速上升到 1999—2010 年的 56.50%,其中,煤矿开采对径流的影响量年均值在 1999—2010 年间达到 29.69 mm,约 2.58 亿 m³/a,成为影响窟野河地表径流减少的主导因素。

关键词:窟野河;地表径流;煤矿开采;黄河月水量平衡模型;模型模拟

中图分类号:TV121⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)04-0019-05

Hydrological simulation of impacts of coal mining on surface runoff in Kuye River//GUO Qiaoling¹, HAN Zhenying¹, YANG Linjie², XIONG Xinzhi¹ (1. Institute of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Yellow River Hydrological Survey and Design Institute, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to make clear the relationship between coal mining and runoff reduction or even drying-up of the Kuye River, China, we analyzed the variation characteristics of runoff with the daily runoff data and related hydrometeorology data from 1953 to 2010 of the Wenjiachuan station, a control hydrological station at the Kuye River. Then, the impacts of coal mining on surface runoff are quantitative simulated by using monthly water balance model of the Yellow River. The results indicate that the measured runoff data generally present a phase-decreasing trend over the last 60 years with turning points in 1979 and 1999. The runoff reduction ratio due to human activities was 39.44% during the period from 1979 to 1998, and it quickly increased to 56.50% during the period from 1999 to 2010, in which the annual average runoff value affected by coal mining reached 29.69 mm, which is equivalent to approximately $2.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{year}$. That is, human activities have become the dominant factor causing reduction of surface runoff in the Kuye River.

Key words: Kuye River; surface runoff; coal mining; monthly water balance model of Yellow River; model simulation

煤炭开采诱发的地下水位下降、泉水流量锐减或干涸、河水减少甚至断流、水污染加重等水环境问题十分严重,其中河川径流减少甚至断流问题尤为突出,已严重影响到矿区经济的发展和群众的生活,使本来就已十分紧张的区域水资源供需矛盾更加尖锐,制约着矿区生态环境建设和经济社会的可持续发展。窟野河是黄土高原与毛乌素沙漠过渡区流量最大的河流,也是神府煤田开发、生态环境维系的主要水源。近年来,随着能源化工基地建设步伐的加快,水资源供需矛盾日益突出,窟野河流量不断减少,甚至出现了连续断流现象。据资料统计,2000 年断流 75 d,2001 年断流 106 d,2002 年断流 220 d,

2003—2005 年每年断流都超过 100 d;2000—2008 年与 1956—2000 年相比,窟野河年平均径流量减少了 71.5%。范立民^[1]分析认为,除气候变化等自然原因外,20 世纪 80 年代中后期开始的煤炭开发,尤其是 20 世纪 90 年代以来的高强度采煤,是造成窟野河流量衰减和断流的主要原因;刘二佳等^[2]采用多元线性回归方法分析认为 1997—2005 年间煤炭开采对径流减少的贡献率达 52.27%;蒋晓辉等^[3]通过月水量平衡模拟发现 1997—2006 年间由于煤炭开采导致的径流减少占该阶段径流变化的 54.8%;吴喜军等^[4]采用逐步回归法分离了降雨、水保措施和煤炭开采量对径流的影响,指出 1999—

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(41201020)

作者简介:郭巧玲(1978—),女,陕西华阴人,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:guoqiaoling@hpu.edu.cn

2010年煤炭开采造成的径流减少占该阶段径流减少的19%；邢肖鹏等^[5]通过月水量平衡模型模拟了窟野河流域径流过程，取得较好的效果。本文通过黄河月水量平衡模型模拟定量研究煤矿开采对窟野河地表径流的影响，以期为矿区流域水资源的合理开采，实现水资源、生态环境保护与煤炭资源开发并举的目标，提供科学的决策依据。

1 流域概况

窟野河是黄河中游河口镇—龙门区间右岸一级支流，发源于内蒙古自治区鄂尔多斯市的巴定沟，经神木县石圪台进入陕西境内，于神木县贺家川乡沙峁头村汇入黄河。流域地理位置在东经109°28′~110°52′，北纬38°23′~39°52′之间，干流全长241.8 km，流域面积约8 706 km²，其支流中流域面积在100~500 km²的有13条，1 000~5 000 km²的有2条^[6]。支流倥牛川与干流的交汇口以上为乌兰木伦河，交汇口以下称窟野河^[7]。流域气候属干旱、半干旱大陆性季风气候，多年平均气温7.9℃，多年平均降水量386 mm，汛期（6—9月）降水量占年降水量的78.7%，多以暴雨形式出现^[8]。流域下垫面条件复杂，上游是风沙草原区，中下游是黄土沟壑区，土质疏松，土壤瘠薄，地表植被稀少，水土流失严重^[9]，是黄河中游水土流失严重的一条多沙粗沙支流^[10]。

窟野河流域煤炭资源丰富，著名的神府东胜特大煤田贯穿流域中部。据地质勘探部门查明，神府东胜煤田储量占全国已探明的1/4^[4]，分布面积达26 565 km²，列入近期开发的矿区面积为2 756 km²，其中位于窟野河流域的矿区面积2 482 km²，主要分布在转龙湾至神木县区间的干流及支流乌兰木伦河两侧^[11]，矿区煤炭具有埋藏浅、易开采、煤质优的特点^[2]。

2 窟野河径流变化与煤炭开采量关系分析

窟野河流域出口控制站——温家川站年径流量呈递减趋势，线性趋势系数为-0.125（图1）。绘制温家川站降水-径流双累积曲线如图2所示，由图2可知人类活动对径流影响的阶段性变化：曲线的第一个转折点是1979年，斜率从0.0169减低到0.0138，表明人类活动对河川径流产生一定影响；第二个转折点是1999年，斜率由0.0138降低为0.0042，斜率的明显减小说明在此之后人类活动的急剧增强。通过计算，1953—1978年平均年径流量7.34亿m³，1979—1998年为5.35亿m³，而1999—2010年是1.66亿m³，据此，可以将时间序列划分为1953—1978年、1979—1998年和1999—2010年3个时期。1979—1998年径流的减少和该时期开展大规模的

水土流失治理有关，20世纪60和70年代流域内各种水土保持措施（梯田、造林、种草、坝地）年平均累积治理面积279 km²，80和90年代迅速增长到1 559 km²^[12]。1999—2010年径流的减少和流域内煤矿开采量大幅度增加有关。据资料统计，1991年，窟野河流域原煤产量625万t，2010年为12 388万t，是1991年的19.82倍。年均原煤产量由20世纪90年代的900万t迅速增加到2000—2010年的5 548万t。20世纪90年代以来窟野河流域的原煤产量与径流变化关系见图3。

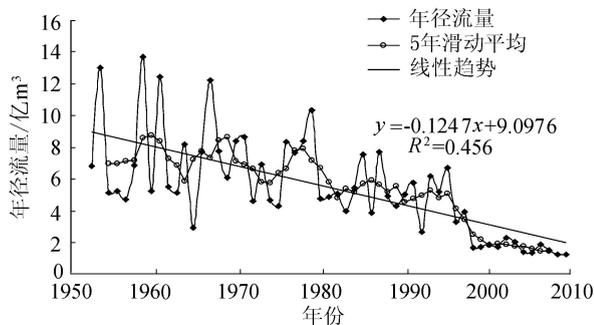


图1 温家川站年径流量变化趋势

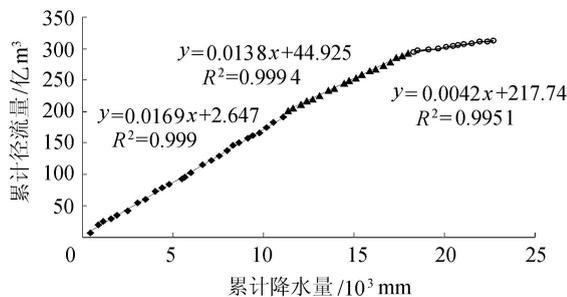


图2 降水-径流双累积曲线

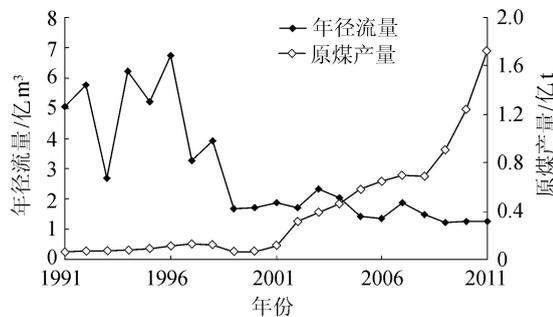


图3 窟野河流域年径流量与年煤产量

3 煤矿开采对地表径流影响模拟

3.1 煤矿开采对径流的影响机制

窟野河流域地层从地表向下分别是风积沙(Q₄^{col})、萨拉乌苏组(Q₃s)、保德组(N_{2b})、安定组(J₂a)、直罗组(J₂z)以及煤炭的主要开采层延安组(J₂y)，具有供水意义的含水层为第四系萨拉乌苏组松散孔隙潜水含水层，目前该流域的煤层位于萨拉乌苏组含水层之下。在采空区顶板形成的部分裂隙

将贯通直罗组、安定组和保德组,并与萨拉乌苏组含水层沟通,改变了矿区水文地质条件,导致潜水由水平径流、排泄为主转化为以垂向渗漏为主,引起地下水位大幅下降。煤矿采空区塌陷,导水裂隙沟通河床,使地表水资源漏失,进而影响河流径流量^[13]。

3.2 黄河月水量平衡模型

3.2.1 模型原理

黄河月水量平衡模型是以水量平衡原理为基础研制的一种概念性水文模型。该模型以逐时段降水量、气温和水面蒸发等气象因子为输入,根据各水文要素间的关系,概化成经验公式来模拟流域水文过程,在黄河中游得到较好的应用。模型考虑了3种径流成分:地表径流、地下径流和融雪径流。计算时,首先计算3种水源,然后根据水量平衡原理计算时段下渗量、流域实际蒸散发和土壤蓄水量,具体计算公式见文献[14]。

3.2.2 模型参数率定

目标函数选择对参数优选结果至关重要^[15],在一定程度上决定了模型的拟合精度。为方便模型在不同流域内应用情况的比较,Nash-Sutcliffe 提出了一个评价标准,其表达式^[16]为

$$R_0^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obsi} - Q_{bari})^2} \quad (1)$$

式中: R_0 为效率系数; Q_{obsi} 为实测径流量; Q_{simi} 为模拟径流量; Q_{bari} 为实测流量的平均值; N 为样本数。该系数在0~1之间变化。

模型的率定还需利用平均相对误差 R_e ,以保证模拟过程中的水量平衡^[3]。其计算式为

$$R_e = \frac{Q_{sim} - Q_{obs}}{Q_{obs}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_{sim} 为模拟的平均年径流量; Q_{obs} 为实测的平均年径流量。

显然,Nash-Sutcliffe 标准越接近1,同时相对误差越接近0,则模拟效果越好。对于水文过程模拟,一般认为 $R_0 > 60\%$ 同时 $R_e < 10\%$ 时,模型合格。

3.2.3 模型检验

为消除人为给定模型状态变量初始值的影响,将资料系列的第1年作为预热期。预热期后的资料分为率定期和检验期,率定期用于模型参数优选,检验期用于检验模型的外延效果,只有在率定期和检验期模拟精度都满足要求的情况下才认为模型合格。

降水、蒸发和气温等气象资料利用中国气象科学数据共享服务网中的榆林气象站资料经计算获得,流量资料采用温家川水文站实测月流量资料,对

温家川1953—1978年(代表天然状况下流域产汇流状况)月流量进行模拟。以1953—1966年为率定期,1967—1978年为验证期。率定期和检验期的月径流模拟效率系数分别是71.42%和82.29%,都在70%以上;相对误差分别为-4.14%和2.71%,控制在5%以内,模拟效果较好。

4 结果分析

根据前面降水-径流双累积曲线揭示的人类活动对径流影响的阶段性变化及实地调查情况,将1953—1978年(基准期)认为是没有人类活动影响时期,用于优化模型参数,利用得到的模型参数模拟出1979—2010年(影响期)的径流量(表1)。影响期的实测径流量与基准期实测径流量之差包括两部分:一是人类活动影响部分,该部分由影响期还原的天然径流量与相应时期的实测径流量计算;二是气候影响部分,该部分为影响期还原的天然径流量与基准期的差值。在整个人类活动影响期,人类活动对径流变化的影响主要表现在两个方面,一是造林种草、修建梯田和淤地坝等水土保持措施,二是大规模的煤矿开采。在1979—1998年和1999—2010年2个时段,气候变化对年径流变化的影响量分别为13.16 mm和27.61 mm,贡献率分别为60.56%和43.50%;而人类活动对年径流变化的影响量分别为8.57 mm和35.86 mm,贡献率分别为39.44%和56.50%,气候变化对径流的影响呈减小趋势,而人类活动对径流的影响呈增加趋势。

表1 人类活动和气候变化对窟野河年径流量减少的贡献程度估算

时段	实测径流深/mm	天然径流深/mm	总减少量/mm	气候因素		人类活动	
				减少量/mm	贡献率/%	减少量/mm	贡献率/%
1953—1978年	82.81						
1979—1998年	61.08	69.65	21.73	13.16	60.56	8.57	39.44
1999—2010年	19.34	55.20	63.47	27.61	43.50	35.86	56.50

在窟野河流域,水土保持综合治理在20世纪70年代进入高潮,20世纪80和90年代水土保持对径流减少起到重要作用^[14]。20世纪90年代末以来,神府东胜煤矿开始大规模开采,导致了径流的进一步减少。以1979—1998年的水土保持期为基准期,用黄河月水量平衡模型模拟1979—1998年的径流量,再用此阶段的参数还原1999—2010年煤炭开发期的径流(表2)。可以看出,1999—2010年煤炭开采对年径流的平均影响量为29.69 mm,约2.58亿 m^3/a ,占该时段变化量的71.13%,成为影响窟野河地表径流的主导因素。

表2 煤炭开采对径流的影响

时段	实测径流 深/mm	天然径流 深/mm	总减少量/ mm	煤炭开采 减少量/mm
1979—1998年	61.08			
1999—2010年	19.34	49.03	41.74	29.69

5 结 语

自1953年以来,窟野河流域径流量呈明显递减趋势。降水-径流双累积曲线揭示人类活动对径流影响的阶段性变化出现两个转折点,分别是1979年和1999年。导致径流迅速递减的主要原因是人类活动,人类活动对径流影响的比例由1979—1998年的39.44%快速上升到1999—2010年的56.50%。人类活动中的煤矿开采是影响窟野河径流锐减的主导因素,其对径流的影响量平均值在1999—2010年达到29.69 mm,约2.58亿 m^3/a ,占该时段变化量的71.13%,成为影响窟野河地表径流的主导因素。

模型模拟过程中,人类活动仅考虑了水土保持和煤矿开采。在实地调查中发现相关工业发展、河道采砂和农业灌溉等也会对地表径流产生一定的影响,因此,本研究结果只是一个粗略估算。为了探明煤矿开采对地表径流的影响,除了进行模型模拟外,还应加强机理研究,通过水化学分析及同位素示踪等技术,进一步探明煤矿开采对地表径流影响的机理,为矿区的可持续发展提供基础支撑。

参考文献:

[1] 范立民. 陕北地区采煤造成的地下水渗漏及其防治对策分析[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(5): 62-64. (FAN Limin. Analysis of groundwater seepage caused by coal mining and countermeasures for prevention and control in Northern Shaanxi Region[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(5): 62-64. (in Chinese))

[2] 刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等. 1956—2005年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1159-1168. (LIU Erjia, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al. Variation of annual streamflow and the effect of human activity in the Kuye River during 1956 to 2005 [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1159-1168. (in Chinese))

[3] 蒋晓辉, 谷晓伟, 何宏谋. 窟野河流域煤炭开采对水循环的影响研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 300-307. (JIANG Xiaohui, GU Xiaowei, HE Hongmou. The influence of coalmining on water resources in the Kuye River basin [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 300-307. (in Chinese))

[4] 吴喜军, 李怀恩, 董颖, 等. 陕北地区煤炭开采等人类活

动对河道径流影响的定量识别[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 772-780. (WU Xijun, LI Huaian, DONG Ying, et al. Quantitative identification of coal mining and other human activities on river runoff in Northern Shaanxi Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(3): 772-780. (in Chinese))

[5] 邢肖鹏, 张文忠, 唐芳芳, 等. 月水量平衡模型在窟野河流域的水文模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 73-78. (XING Xiaopeng, ZHANG Wenzhong, TANG Fangfang, et al. Hydrological simulation of water balance model in the Kuye River catchment [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(6): 73-78. (in Chinese))

[6] 苏贺, 康卫东, 曹珍珍, 等. 1954—2009年窟野河流域降水与径流变化趋势分析[J]. 地下水, 2013, 35(6): 14-17. (SU He, KANG Weidong, CAO Zhenzhen, et al. Analysis on precipitation and runoff changing trend from 1954 to 2009 in Kuye River Basin [J]. Ground Water, 2013, 35(6): 14-17. (in Chinese))

[7] 赵晓坤, 王随继. 窟野河洪水特性及变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 92-96. (ZHAO Xiaokun, WANG Suiji. Analysis on the flood characteristics and its change trend in the Kuye River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(4): 92-96. (in Chinese))

[8] 王英顺, 贾泽祥, 胡建军, 等. 窟野河流域生态建设工程布局探讨[J]. 中国水土保持, 2003(5): 32-33. (WANG Yingshun, JIA Zexiang, HU Jianjun, et al. Research on project layout of ecology construction in Kuye River Catchment [J]. Soil and Water Conservation in China, 2003(5): 32-33. (in Chinese))

[9] 王国庆, 张建云, 李岩. 窟野河流域径流演变及其驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 7-16. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LI Yan, et al. Analysis of runoff evolution and factor of driving force in Kuye River Catchment [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(2): 7-16. (in Chinese))

[10] 赵晓坤, 王随继, 范小黎. 1954—1993年间窟野河径流量变化趋势及其影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(5): 32-36. (ZHAO Xiaokun, WANG Suiji, FAN Xiaoli. Analysis on the change trend of runoff and influence factors in Kuye River Basin from 1954 to 1993 [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(5): 32-36. (in Chinese))

[11] 刘晓琼, 刘彦随, 李同昇, 等. 高强度能源开发区河流径流量演变及其减流成因: 以窟野河为例[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2014, 50(3): 299-304. (LIU Xiaoqiong, LIU Yansui, LI Tongsheng, et al. Changes and reduction causes of annual runoff in intensive energy development area: a case study of Kuye River [J]. Journal

of Lanzhou University: Natural Sciences, 2014, 50 (3): 299-304. (in Chinese))

[12] 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J]. 生态学报, 2013, 33 (5): 1559-1568. (LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1559-1568. (in Chinese))

[13] 吕新, 王双明, 杨泽元, 等. 神府东胜矿区煤炭开采对水资源的影响机制: 以窟野河流域为例[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42 (2): 54-61. (LÜ Xin, WANG Shuangming, YANG Zeyuan, et al. Influence of coal mining on water resources: a case study in Kuye River Basin [J]. Coal

Geology & Exploration, 2014, 42(2): 54-61. (in Chinese))

[14] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[15] 苏凤阁, 谢正辉. 气候变化对中国径流影响评估模型研究[J]. 自然科学学报, 2003, 13 (5): 502-507. (SU Fengge, XIE Zhenghui. Study on evaluation model for impacts of climatic changes on the runoff in China [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13 (5): 502-507. (in Chinese))

[16] 焦恩泽. 窟野河水沙变化趋势初步分析[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 1-57.

(收稿日期: 2014-08-24 编辑: 熊水斌)

(上接第 18 页)

[3] 徐锋俊, 朱士康, 王华. 伶仃洋水动力环境分析及治理策略探讨[J]. 人民珠江, 2004 (1): 11-14. (XU Fengjun, ZHU Shikang, WANG Hua. Analysis of hydrodynamic environment of Lingdingyang Bay and improvement strategy [J]. Pearl River, 2004 (1): 11-14. (in Chinese))

[4] 谭超, 黄本胜, 龚文平, 等. 珠江磨刀门河口排洪动力特征及拦门沙演变响应的初步研究[J]. 水利学报, 2013, 44 (9): 1023-1029. (TAN Chao, HUANG Bensheng, GONG Wenping, et al. The dynamics of flood releasing and its effects on the morphological evolution of the mouth bar in the Modaomen Estuary of the Pearl River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (9): 1023-1029. (in Chinese))

[5] 贾良文, 吴超羽, 任杰, 等. 珠江口磨刀门枯季水文特征及河口动力过程[J]. 水科学进展, 2006, 17 (1): 82-88. (JIA Liangwen, WU Chaoyu, REN Jie, et al. Hydrologic characteristics and estuarine dynamic process during the dry season in Modaomen Estuary of the Pearl River [J]. Advances in Water Sciences, 2006, 17 (1): 82-88. (in Chinese))

[6] 应秩甫, 陈世光. 珠江口伶仃洋咸淡水混合特征[J]. 海洋学报, 1983, 5 (1): 1-10. (YING Zhifu, CHEN Shiguang. Mixing characteristics of saline and fresh water in Lingdingyang Bay of the Pearl River [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1983, 5(1): 1-10. (in Chinese))

[7] 韩志远, 田向平, 刘峰. 珠江磨刀门水道咸潮上溯加剧的原因[J]. 海洋学研究, 2010, 28 (2): 52-59. (HANG Zhiyuan, TIAN Xiangping, LIU Feng. Study on the causes of intensified saline water intrusion into Modaomen Estuary of the Zhujiang River in recent years [J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(2): 52-59. (in Chinese))

[8] 诸裕良, 闫晓璐, 林晓瑜. 珠江口盐水入侵预测模式研

究[J]. 水利学报, 2013, 44 (9): 1009-1014. (ZHU Yuliang, YAN Xiaolu, LIN Xiaoyu. Study on prediction model of saline intrusion in Pearl River Delta [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (9): 1009-1014. (in Chinese))

[9] 邱耀文, 王肇鼎. 珠江口伶仃洋水域溶解氧特征[J]. 热带海洋, 1994, 13 (2): 99-102. (QIU Yaowen, WANG Zhaoding. Characteristics of dissolved oxygen in Lingdingyang waters Zhujiang River Estuary [J]. Tropic Oceanology, 1994, 13(2): 99-102. (in Chinese))

[10] 曹玉鹏, 吉锋. 吹填淤泥沉积规律室内试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (3): 36-39. (CAO Yupeng, JI Fen. Model tests on sedimentation behavior of dredged sludge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (3): 36-39. (in Chinese))

[11] CHEN S S, FANG L G, ZHANG L X, et al. Remote sensing of turbidity in seawater intrusion reaches of Pearl River Estuary: a case study in Modaomen water way, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 82: 119-127.

[12] 陈祖军. 后三峡工程时代长江口水源地盐水入侵规律及其应对措施[J]. 水资源保护, 2014, 30 (3): 19-24. (CHEN Zujun. Saltwater intrusion into water source zone in Yangtze Estuary in post-Three Gorges engineering era and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3): 19-24. (in Chinese))

[13] 刘杰斌, 包芸, 黄宇铭. 丰、枯水年磨刀门水道盐水上溯运动规律对比[J]. 力学学报, 2010, 42 (6): 1098-1103. (LIU Jiebin, HUANG Yuming, Sun Yuming. Contrast of movement law of saline intrusion in Modaomen waterway in the wet year and the dry year [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42 (6): 1098-1103. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-06-23 编辑: 郑孝宇)